

P R I O R   A R T   I N F O R M A T I O N   L I S T

Your Case No.	
Our Case No.	PA01 - 46FT - USA

Publication No.	Date of Publication	Concise Explanation of the Relevance
JP09-149006A	June 6, 1997	Abstract

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-149006

(43)Date of publication of application : 06.06.1997

(51)Int.Cl.

H04J 14/00

H04J 14/04

H04J 14/06

H04J 14/02

H04B 10/02

(21)Application number : 07-300303

(71)Applicant : FUJITSU LTD

(22)Date of filing : 17.11.1995

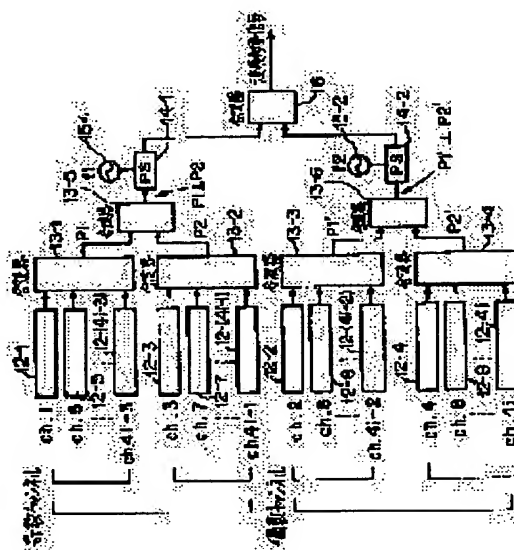
(72)Inventor : OTSUKA KAZUE  
ONAKA HIROSHI  
TERAHARA TAKAFUMI  
NAITO TAKAO

## (54) POLARIZATION SCRAMBLE TYPE WAVELENGTH MULTIPLEX SIGNAL TRANSMISSION METHOD AND POLARIZATION SCRAMBLE TYPE WAVELENGTH MULTIPLEX SIGNAL TRANSMITTER

## (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To efficiently suppress the generation of a nonlinear optical effect and to improve the transmission quality of wavelength multiplex signals by executing polarization scrambling by respectively different frequencies or different polarization directions to the signal light of plural channels.

**SOLUTION:** Respective signal light transmission parts 12-1 to 12-4i generate and transmit the signal light of different wavelengths respectively for the plural channels ch.1-ch.4i to be wavelength multiplexed. In this case, the respective signal light transmission parts 12-1 to 12-4i, are divided into an odd-numbered channel group and an even-numbered channel group and respective multiplexers 13-1 to 13-6 and 16 wavelength-multiplex the signal light from the respective signal light transmission parts 12-1 to 12-4i by multiplexing the respectively inputted plural pieces of the signal light. Then, while holding the straight polarization of each signal light from the signal light transmission parts 12-1 to 12-4i of the respective channels, the signal light is propagated and the signal light is multiplexed while holding it.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

特開平9-149006

(43) 公開日 平成9年(1997)6月6日

(51) Int. Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所	
H 0 4 J	14/00		H 0 4 B	9/00	F
	14/04				E
	14/06				H
	14/02				
H 0 4 B	10/02				
審査請求 未請求 請求項の数 2 3			O L	(全 2 6 頁)	

(21) 出願番号 特願平7-300303

(22) 出願日 平成7年(1995)11月17日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号

(72) 発明者 大塚 和恵

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地  
富士通株式会社内

(72) 発明者 尾中 寛

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地  
富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 真田 有

最終頁に続く

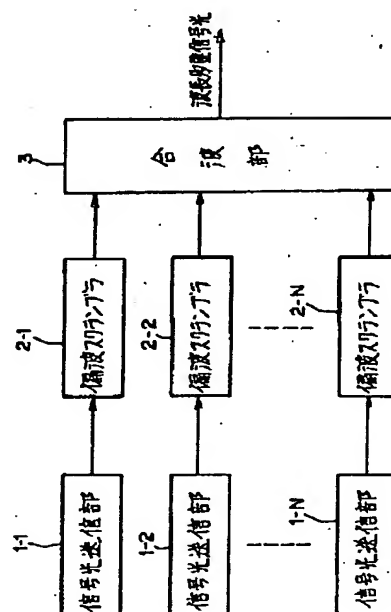
(54) 【発明の名称】 偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法及び偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置

## (57) 【要約】

【課題】 偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法及び偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置に関し、複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すことにより、非線形光学効果の発生を効率的に抑制して波長多重信号の伝送品質を向上する。

【解決手段】 波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光送信部1-1～1-Nと、複数の偏波スクランブラ2-1～2-Nとをそなえ、各信号光送信部1-1～1-Nからの信号光に対し複数の偏波スクランブラ2-1～2-Nによりそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すように構成する。

## 本発明の原理ブロック図



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施して、波長多重信号を伝送することを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項2】 上記の波長多重された複数チャンネルの全てのチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すことを特徴とする、請求項1記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項3】 上記の波長多重された複数チャンネルの少なくとも一部のチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数または所定の周波数で偏波スクランブルを施すことを特徴とする、請求項1記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項4】 着目チャンネルの信号光に所定周波数で偏波スクランブルを施した場合、該着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と該着目チャンネルの信号光に隣接する隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差が、該着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と該着目チャンネルの信号光に隣接しない非隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差よりも大きくなるように設定されていることを特徴とする、請求項1記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項5】 波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる偏光方位で偏波スクランブルを施して、波長多重信号を伝送することを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項6】 上記の波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、同一の周波数で偏波スクランブルを施すことを特徴とする、請求項5記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項7】 上記の波長多重された複数チャンネルの信号光のうちのある一対のチャンネルの信号光対に対しては、それぞれ異なる偏光方位であって且つ同一の周波数で偏波スクランブルを施すとともに、上記の波長多重された複数チャンネルの信号光のうち他の一対のチャンネルの信号光対に対しては、それぞれ異なる偏光方位であって且つ上記ある一対のチャンネルの信号光対に対して施す周波数とは異なる周波数で偏波スクランブルを施すことを特徴とする、請求項5記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項8】 該異なる偏光方位が、相互に直交する偏光方位であることを特徴とする、請求項5または請求項7に記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法。

【請求項9】 波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光送信部と、各信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施す複数の偏波スクランブラ

とをそなえて構成されていることを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項10】 上記複数の信号光送信部の全ての信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すべく、複数の偏波スクランブラをそなえて構成されていることを特徴とする、請求項9記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項11】 上記複数の信号光送信部の少なくとも一部の信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数または所定の周波数で偏波スクランブルを施すべく、複数または1つの偏波スクランブラをそなえて構成されていることを特徴とする、請求項9記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項12】 波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光送信部をそなえとともに、該複数の信号光送信部を複数のグループに分割し、1グループを構成する信号光送信部からの信号光に対しては、同一の周波数で偏波スクランブルを施すが、異なったグループを構成する信号光送信部からの信号光に対しては、異なった周波数で偏波スクランブルを施すべく、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施す複数の偏波スクランブラをそなえて構成されていることを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項13】 該複数の偏波スクランブラがそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化されていることを特徴とする、請求項9または請求項12に記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項14】 該複数の信号光送信部を奇数チャンネルの信号光のグループと偶数チャンネルの信号光のグループとに分割し、該複数の偏波スクランブラが、該奇数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部からの信号光に対して、第1周波数で偏波スクランブルを施す第1偏波スクランブラと、該偶数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部からの信号光に対して、該第1周波数とは異なる第2周波数で偏波スクランブルを施す第2偏波スクランブラとで構成されたことを特徴とする、請求項12記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項15】 上記の第1偏波スクランブラ及び第2偏波スクランブラがそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化されていることを特徴とする、請求項14記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項16】 波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光送信部をそなえ、該複数の信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、

10

20

30

40

50

該複数の信号光送信部からの信号光に対しては、同一の周波数で偏波スクランブルを施す偏波スクランブラが設けられていることを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 17】 該一部の信号光送信部が奇数チャンネルの信号光用信号光送信部として構成されるとともに、該残りの信号光送信部が偶数チャンネルの信号光用信号光送信部として構成されていることを特徴とする、請求項 16 記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 18】 該複数の信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すように構成されていることを特徴とする、請求項 16 記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 19】 該偏波スクランブラが現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化されていることを特徴とする、請求項 16 記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 20】 波長多重されるべき複数のチャンネル用の複数の信号光送信部をそなえ、

該複数の信号光送信部を奇数チャンネルの信号光用信号光送信部と偶数チャンネルの信号光用信号光送信部とに分割し、

該奇数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、

該奇数チャンネルの信号光用信号光送信部からの信号光に対しては、第 3 周波数で偏波スクランブルを施す第 3 偏波スクランブラが設けられ、

且つ、該偶数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、

該偶数チャンネルの信号光用信号光送信部からの信号光に対しては、該第 3 周波数とは異なる第 4 周波数で偏波スクランブルを施す第 4 偏波スクランブラが設けられていることを特徴とする、偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 21】 該第 3 偏波スクランブラ及び該第 4 偏波スクランブラがそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化されていることを特徴とする、請求項 20 記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 22】 該奇数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すとともに、該偶数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すように構成されていることを特徴とする、請求項 20 記載

の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【請求項 23】 該信号光送信部がそれぞれ現用信号光送信部と予備用信号光送信部とをそなえて二重化されていることを特徴とする、請求項 9～12, 14, 16, 17, 20, 22 のいずれかに記載の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】 (目次)

発明の属する技術分野

10 従来の技術 (図 27, 図 28)

発明が解決しようとする課題 (図 28)

課題を解決するための手段 (図 1～図 6)

発明の実施の形態

(a) 第 1 実施形態の説明 (図 7～図 11)

(b) 第 2 実施形態の説明 (図 12)

(c) 第 3 実施形態の説明 (図 13, 図 14)

(d) 第 4 実施形態の説明 (図 15, 図 16)

(e) 第 5 実施形態の説明 (図 17～図 23)

(f) 第 6 実施形態の説明 (図 24)

20 (g) 第 7 実施形態の説明 (図 25, 図 26)

発明の効果

【0002】

【発明の属する技術分野】本発明は、偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法及び偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置に関する。

【0003】

【従来の技術】近年、エルビウムドープ (添加) 光ファイバ (EDF) を用いた EDF 光増幅器の出現により、光 (信号光) の直接増幅を行なう伝送システムの研究が盛んに行なわれてきている。この EDF 光増幅器は、利得波長帯域が広いため、波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 伝送を行ない、各波長の一括増幅中継を行なうことができるようになる。

【0004】しかし、現在、一般に使用されている光ファイバの材質は石英系で、本質的には非線形性が非常に小さい材質であるが、通常、WDM 伝送方式では、光波を 10  $\mu$ m 程度の微細な領域 (光ファイバ) に閉じ込めて信号光を伝送するために、パワー密度が非常に高くなることや、低損失で伝播モードが規制されているにもかかわらず、光波と光ファイバの材料の相互作用長が非常に長いなどの理由から、各種の非線形光学効果の影響が顕著に現れる可能性があり、これが WDM 伝送時の伝送品質を劣化させる要因となる。

【0005】ここで、WDM 伝送時の伝送品質に影響を与える光ファイバの非線形光学効果としては、周知のように、誘導ブリルアン散乱、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation)、ラマン散乱、四光子混合 (FWM)、相互位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation) などが挙げられる。このうち、FWM や XPM は各信号光の偏光状態の相対関係によって信号光への影響が

異なるために、伝送路（光ファイバ）中で信号光の偏光状態が変化するとSNR（信号対ノイズ比）が時間的に揺らぐ。

【0006】また、例えば、文献「IEEE J. Lightwave Technol., 6, No. 11, pp1750 ~1769」によると、上記の各種の非線形光学効果のうち、システム設計に最も厳しい条件を与えるのはFWM光であることが分かっている。このFWM光は、例えば、図27（a）、図27（b）に示すように、四光子混合による信号光波（周波数  $f_i$ 、\*

$$P_{ijk} = \eta_{ijk} \cdot \frac{1024 \pi^4 \chi_{1111}^2 d^2}{n^4 \lambda^2 c^2} \cdot \left( \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \right) P_i P_j P_k \exp(-\alpha L) \quad \dots \dots (1)$$

【0009】

※ ※【数2】

$$\eta_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \cdot \left( 1 + 4 \exp(-\alpha L) \cdot \frac{\sin^2(\Delta\beta L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L)]^2} \right) \quad \dots \dots (2)$$

【0010】

★ ★【数3】

$$\Delta\beta = - \frac{\lambda^4 \pi}{c^2} \cdot \frac{dD}{d\lambda} \left[ (f_i - f_o) + (f_j - f_o) \right] \times (f_i - f_k) (f_j - f_k) \quad \dots \dots (3)$$

【0011】ただし、

$P_{ijk}$  : FWM光パワー  
 $P_i, P_j, P_k$  : 入力光パワー  
 $n$  : 光ファイバ中の屈折率  
 $c$  : 光速  
 $d$  : 縮退係数 ( $i=j=k$  のとき  $d=3$ ,  $i \neq j \neq k$  のとき  $d=6$ )  
 $L$  : 光ファイバ長  
 $L_{eff}$  : 実効ファイバ長  $[(1 - \exp(-\alpha L))/\alpha]$   
 $f_i, f_j, f_k$  : 信号光周波数  
 $D$  : 光ファイバの分散値

$\Delta\beta$  : 位相不整合量  
 $\lambda$  : 波長  
 $\chi_{1111}$  : 3次の非線形感受率  
 $\alpha$  : 光ファイバの損失係数  
 $f_o$  : 零分散周波数  
 $A_{eff}$  : 実効断面積  
 $dD/d\lambda$  : 分散スロープ

である。

【0012】ここで、上記の式（1）は、FWM光パワー（ $P_{ijk}$ ）が非線形効果の大きさ（ $\chi_{1111}$ ）、入力光パワー（ $P_i, P_j, P_k$ ）及び偏光状態に依存していることを示し、式（2）は、位相不整合量（ $\Delta\beta$ ）に伴うFWM光の発生効率  $\eta_{ijk}$  を示し、さらに式（3）は、位相不整合量（ $\Delta\beta$ ）が信号光周波数（ $f_i, f_j, f_k$ ）の間隔と光ファイバの分散値（ $D$ ）とに依存することを示している。

【0013】つまり、FWM光の発生効率  $\eta_{ijk}$  は、主に、光波間の波長間隔と光ファイバの分散値とに依存する位相不整合量  $\Delta\beta$  によって決まることが分かる。この

\*  $f_j, f_k$ ）間の光周波数混合により、新たに発生する信号光（周波数  $f_{ijk}$ ）で、これが元の各信号光波（周波数  $f_i, f_j, f_k$ ）のクロストークとなり、WDM伝送時の伝送特性を劣化させる1つの要因となっている。

【0007】ところで、このFWM光の発生効率  $\eta_{ijk}$  には、次式（1）～（3）に示すような関係がある。

【0008】

【数1】

ため、伝送損失が最小となる1.5  $\mu m$  帯付近に光ファイバの零分散域を移した分散シフトファイバを伝送路として用いた場合には、このFWM光の影響が顕著に現れる。また、分散値が零に近い波長での伝送はクロストークの影響を大きく受けるので、これを避けるために光ファイバへの入射パワーを下げる必要があり、伝送特性に大きな制約を受けることになる。

【0014】例えば、等間隔に波長（周波数）が配置された波長多重信号（WDM信号）の場合は、同一波長に現れるFWM光が多数存在するが、特に、隣接する波長の信号光ほどその数が多くなる。次表1は16本（16チャンネル）の異なる波長の信号光を波長多重する16

WDM時の各波長に生じるFWM光の総数を示しており、この表1から分かるように、チャンネル番号8とチャンネル番号9のように隣接するチャンネルで生じるF

\*WM光の数が最も多くなっている。

【0015】

【表1】

16波WDM伝送時の各チャンネルに生じるFWM光の総数

チャンネルNo.	1	2	3	4	5	6	7	8
	16	15	14	13	12	11	10	9
FWM 光数 (本)	56	63	69	74	78	81	83	84

【0016】なお、ある波長のFWM光によるクロストーク量は、上式(1)～(3)を用いて、全てのi, j, kの組み合わせに基づくFWM光パワーを独立に求め、得られた各FWM光パワーを加算することにより算出される。このため、現在のところ、FWM光が発生してもこれが元の信号光波長に影響を与えないような波長配置を設定したり、光ファイバの零分散波長からある程度離れた波長域を使用するなどして、WDM信号伝送時のFWM光による影響に対する対策がなされている。しかし、光増幅器の広帯域化、波長多重する信号光数の増加への要求が強く、波長設定だけでは対応が困難になりつつある。

【0017】そこで、従来は、例えば、文献「J. Lightwave Technol., vol. 11, pp. 2116-2122, 1993」で述べられているように、波長多重する信号光を無偏光化することによりFWM光の発生を抑圧する方法なども提案されている。また、WDM信号の伝送システムでは、上述のように、光増幅技術を適用することにより、波長の異なる複数の信号光を大量に長距離伝送することが可能になるが、この場合、光増幅器の偏光依存性利得や使用する光部品の偏光依存性損失が、SNRを大きく劣化させることが知られている。特に、エルビウムドープ光ファイバを用いたEDF光増幅器の場合、偏光依存性利得の主要因は、PHB (Polarization Hole Burning) 効果である。

【0018】そこで、従来は、EDF光増幅器への入力偏波状態をPBHの応答速度に比べて高速に変化させることにより、PHB効果による影響を効率的に緩和し、SNRの劣化を抑制することが行なわれている。また、光部品の偏光依存性損失によって生じるSNR劣化は、信号光の偏光状態を伝送速度よりも高速にスクランブルすれば、抑圧することが可能であるため、偏光状態をスクランブルする手段として、電気光学効果を応用した偏波スクランブラ、光ファイバへの応力によるファイバの複屈折率変化を利用した偏波スクランブラなどが開発されている。

【0019】例えば、図28は従来の偏波スクランブル式波長多重伝送装置の一例を示すブロック図で、この図28に示す装置は、4チャンネル分の信号光送信部21-1～21-4、合波器22、光ファイバを円状に形成して構成された偏波制御部(PC: Polarization Contr

oller) 23、変調部25、偏波スクランブラ (PS: Polarization Scrambler) 26及び増幅器27をそなえて構成され、さらに、各信号光送信部21-1～21-4は、受光素子211、レーザ・ダイオード212及び偏波制御部(PC) 213をそなえて構成されている。

【0020】これにより、上述の装置では、各信号光送信部21-1～21-4からの4チャンネル分の各信号光を合波器22で合波して波長多重したのち、変調部25により、NRZ (Non-Return to Zero) データを用いて変調を施し、偏波スクランブラ26で一括して(同一周波数で) 偏波スクランブルを施すことによって、効果的に、波長多重信号伝送時の非線形光学効果の影響を抑制できるようになっている。

【0021】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、このような従来の偏波スクランブル式波長伝送装置でも、やはりFWM光やXPMなどの非線形光学効果の発生を十分には抑制できず、装置のSNRが劣化してしまうという課題がある。本発明は、このような課題に鑑み創案されたもので、複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数、あるいは異なる偏光方位で偏波スクランブルを施すことにより、非線形光学効果の発生を効率的に抑制して波長多重信号の伝送品質を向上できるようにした、偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法及び偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置を提供することを目的とする。

【0022】

【課題を解決するための手段】図1は本発明の原理ブロック図で、この図1に示す偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置において、1-1～1-N (ただし、Nは自然数) はそれぞれ信号光送信部、2-1～2-Nはそれぞれ偏波スクランブラ、3は合波部である。ここで、各信号光送信部1-1～1-Nは、それぞれ波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光を送信するものであり、各偏波スクランブラ2-1～2-Nは、それぞれ各信号光送信部1-1～1-Nからの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すものであり、合波部3は、各偏波スクランブラ2-1～2-Nからの複数チャンネル分の信号光を波長多重するものである。(請求項9)。

【0023】このような構成により、上述の偏波スクラ



ンブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、各偏波スクランブラ2-1~2-Nによってそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルが施されるので、隣接チャンネルの信号光の偏光状態が相互に変化し、全信号光でその偏光状態が平均化された状態で波長多重信号が伝送される(請求項1)。

【0024】具体的に、このとき、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接する隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差が、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接しない非隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差よりも大きくなるように設定すれば、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互により大きく異なった状態にすることができる(請求項4)。

【0025】なお、この図1においては、各偏波スクランブラ2-1~2-Nにより、上記複数の信号光送信部1-1~1-Nからの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルが施されるようになっているが(請求項2, 10)、例えば、 $N > 2$ の場合は複数の偏波スクランブラ(例えば、偏波スクランブラ2-2~2-N)をそなえ、 $N = 2$ の場合は1つの偏波スクランブラ(例えば、偏波スクランブラ2-2)をそなえて、上記複数の信号光送信部1-1~1-Nの少なくとも一部の信号光送信部1-2~1-Nからの信号光に対してそれぞれ異なる周波数( $N > 2$ の場合)または所定の周波数( $N = 2$ の場合)で偏波スクランブルが施されるようにしてもよい(請求項3, 11)。

【0026】次に、図2も本発明の原理ブロック図で、この図2においても、1-1~1-Nはそれぞれ信号光送信部、2-1~2-M(ただし、 $M < N$ )はそれぞれ偏波スクランブラ、3-1~3-M、4はそれぞれ合波部であるが、この場合は、複数の信号光送信部1-1~1-Nが複数(M)のグループに分割され、複数の偏波スクランブラ2-1~2-Mがそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すようになっている。

【0027】つまり、1グループ(例えば、第1グループ)を構成する信号光送信部1-1~1-i(ただし、 $i < N$ )からの信号光に対しては、偏波スクランブラ2-1により同一の周波数で偏波スクランブルが施されるが、異なったグループ(例えば、第2~第Mグループ)を構成する信号光送信部1-(i+j)~1-Nからの信号光に対しては、偏波スクランブラ2-2~2-Mによりそれぞれ異なった周波数で偏波スクランブルが施されるようになっている(請求項12)。

【0028】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置でも、波長多重された複数チャンネル(ただし、この場合は、信号光送信部1-

1~1-Nを分割した複数のグループをそれぞれ1チャンネルと考える)の信号光に対し、各偏波スクランブラ2-1~2-Mによってそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルが施されるので、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互に変化させて全信号光で平均化した状態で、波長多重信号を伝送することができる(請求項1)。

【0029】また、この場合も、着目チャンネル(着目グループ)の信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接する隣接チャンネル(隣接グループ)の信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差が、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接しない非隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差よりも大きくなるように設定すれば、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互により大きく異なった状態にすることができる(請求項4)。

【0030】さらに、この図2においても、各偏波スクランブラ2-1~2-Mにより、全てのチャンネル(グループ)からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルが施されるようになっているが(請求項2, 10)、例えば、分割後のグループ数が「2」より多い場合は複数の偏波スクランブラ2-2~2-Mをそなえ、分割後のグループ数が「2」の場合は1つの偏波スクランブラをそなえて、複数の信号光送信部1-1~1-Nの少なくとも一部の信号光送信部(異なったグループの信号光送信部1-(i+1)~1-N)からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数(グループ数が「2」より多い場合)または所定の周波数(グループ数が「2」の場合)で偏波スクランブルが施されるようにしてもよい(請求項3, 11)。

【0031】なお、上述の各偏波スクランブラ2-1~2-Mはそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化してもよい(請求項13)。また、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置は、例えば、図3に示すように、複数の信号光送信部1-1~1-Nを奇数チャンネルの信号光のグループ(信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(2i-1))と偶数チャンネルの信号光のグループ(信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-(2i))とに分割し、複数の偏波スクランブラ2-1~2-Mを、第1偏波スクランブラ2-1'と第2偏波スクランブラ2-2'とで構成してもよい。

【0032】ここで、第1偏波スクランブラ2-1'は、奇数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(2i-1)からの信号光に対して、第1周波数で偏波スクランブルを施すものであり、第2偏波スクランブラ2-2'は、偶数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信



部1-2, 1-4, ..., 1-2iからの信号光に対して、第1周波数とは異なる第2周波数で偏波スクランブルを施すものである(請求項14)。

【0033】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、複数の信号光送信部1-1~1-Nを奇数チャンネルの信号光のグループと偶数チャンネルの信号光のグループとに分割することで、波長多重された複数チャンネルの信号光(ただし、この場合は、奇数チャンネル、偶数チャンネルのグループからの各信号光)に対し、第1, 第2偏波スクランブラ2-1', 2-2'によってそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルが施されるので、さらに、隣接チャンネルの信号光の偏光状態が相互により大きく異なる状態で、波長多重信号が伝送される(請求項1)。

【0034】また、この場合も、着目チャンネル(ただし、この場合は、奇数チャンネルのグループ又は偶数チャンネルのグループ)の信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接する隣接チャンネル(偶数チャンネルのグループ又は奇数チャンネルのグループ)の信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差が、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接しない非隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差よりも大きくなるように設定すれば、隣接チャンネルの信号光の偏光状態をさらに相互に大きく異なった状態にすることができる(請求項4)。

【0035】なお、第1偏波スクランブラ2-1'及び第2偏波スクランブラ2-2'はそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化してもよい(請求項15)。次に、図4も本発明の原理ブロック図で、この図4に示す偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置においても、1-1~1-Nは信号光送信部、2は偏波スクランブラ、3は合波部であるが、この場合は、複数の信号光送信部1-1~1-Nのうちの一部の信号光送信部(例えば、信号光送信部1-1~1-i:ただし、2i=N)と残りの信号光送信部(例えば、信号光送信部1-(i+1)~1-N)とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成されるとともに、各信号光送信部1-1~1-Nからの信号光に対しては、偏波スクランブラ2により同一の周波数で偏波スクランブルが施されるようになっている(請求項16)。

【0036】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、偏波スクランブラ2によりそれぞれ異なる偏光方位で偏波スクランブルが施されるので、隣接チャンネルの偏光状態を所要量異なった状態にして、波長多重信号を伝送することができる(請求項5)。

【0037】従って、波長多重された複数チャンネルの

信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施さなくとも、同一の周波数で偏波スクランブルを施せば、隣接チャンネルの偏光状態を所要量異なった状態にして、波長多重信号を伝送することができる(請求項6)。なお、この場合も、図5に示すように、上述の一部の信号光送信部1-1~1-iを奇数チャンネルの信号光用信号光送信部(1-1, 1-3, ..., 1-(2i-1))として構成するとともに、残りの信号光送信部1-(i+1)~1-Nを偶数チャンネルの信号光用信号光送信部(1-2, 1-4, ..., 1-2i)として構成すれば、予め隣接チャンネルの偏光状態を相互に異なった状態にしておくことができる(請求項17)。

【0038】また、具体的に、上述の異なる偏光方位とは相互に直交する偏光方位で、この場合は、複数の信号光送信部1-1~1-Nのうちの一部の信号光送信部1-1~1-iと残りの信号光送信部1-(i+1)~1-Nとでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルが施される(請求項8, 18)。さらに、上述の偏波スクランブラ2は現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化してもよい(請求項19)。

【0039】次に、図6も本発明の原理ブロック図で、この図6において、1-1~1-Nはそれぞれ波長多重されるべき複数チャンネル用の信号光送信部、2-1''は第3偏波スクランブラ、2-2''は第4偏波スクランブラ、3-1~3-4, 4-1, 4-2, 5はそれぞれ合波部であるが、この場合は、複数の信号光送信部1-1~1-Nが奇数チャンネルの信号光用信号光送信部[奇数グループ: 信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(4i-1):ただし、4i=N]と偶数チャンネルの信号光用信号光送信部(偶数グループ: 信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-4i)とに分割され、奇数チャンネルの信号光用信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(4i-1)のうちの一部の信号光送信部1-1, 1-5, ..., 1-(4i-3)と残りの信号光送信部1-3, 1-7, ..., 1-(4i-1)とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成され、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-4iのうちの一部の信号光送信部1-2, 1-6, ..., 1-(4i-2)と残りの信号光送信部1-4, 1-8, ..., 1-4iとでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成されている。

【0040】そして、奇数チャンネルの信号光用信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(4i-1)からの信号光に対しては、第3偏波スクランブラ2-1''により第3周波数で偏波スクランブルが施され、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-4iからの信号光に対しては、第4偏波スクランブラ2-2''により第3周波数とは異なる第4周波数で偏波スクランブルが施されるようになっている(請求

項20)。

【0041】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重された複数チャンネルの信号光のうちのある一対のチャンネルの信号光対（例えば、奇数チャンネルグループからの信号光対）に対しては、第3偏波スクランブラ2-1"によってそれぞれ異なる偏光方位であって且つ同一の周波数（第3周波数）で偏波スクランブルが施されるとともに、他の一対のチャンネルの信号光対（例えば、偶数チャンネルグループからの信号光対）に対しては、第4偏波スクランブラ2-2"によって、それぞれ異なる偏光方位であって且つ上記のある一対のチャンネルの信号光対（奇数チャンネルグループからの信号光対）に対して施す周波数とは異なった周波数（第4周波数）で偏波スクランブルが施される。

【0042】この結果、各信号光送信部1-1~1-Nからの各信号光は、隣接チャンネルの信号光の偏光状態が、奇数チャンネルグループの一部と残りの信号光、偶数チャンネルグループの一部と残りの信号光というように、より細かく相互に異なる状態にされる（請求項7）。なお、この場合も、第3偏波スクランブラ2-1"及び第4偏波スクランブラ2-2"はそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラとをそなえて二重化してもよい（請求項21）。

【0043】また、具体的に、この図6に示す偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置においても、上述の異なる偏光方位とは、相互に直交する偏光方位であるが、この場合は、奇数チャンネルの信号光用信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(4i-1)のうちの一部の信号光送信部1-1, 1-5, ..., 1-(4i-3)と残りの信号光送信部1-3, 1-7, ..., 1-(4i-1)とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すとともに、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-4iのうちの一部の信号光送信部1-2, 1-6, ..., 1-(4i-2)と残りの信号光送信部1-4, 1-8, ..., 1-4iとでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すように構成される（請求項8, 22）。

【0044】なお、図1~図6に示す偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置は、信号光送信部1-1~1-Nをそれぞれ現用信号光送信部と予備用信号光送信部とをそなえて二重化してもよい（請求項23）。

#### 【0045】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。

#### （a）第1実施形態の説明

図7は本発明の第1実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で、この図7において、12-1~12-4i（iは自然数）

はそれぞれ信号光送信部、13-1~13-6, 16はそれぞれ合波器、14-1, 14-2はそれぞれ偏波スクランブラ（PS:Polarization Scrambler）、15-1, 15-2は発振器である。

【0046】ここで、各信号光送信部12-1~12-4iは、波長多重されるべき複数チャンネルch. 1~ch. 4i用にそれぞれ波長の異なる信号光を生成して送信するもので、それぞれ図8に示すように、各チャンネルch. 1~ch. 4iに対応する所望の波長の信号光を発生するレーザ・ダイオード（LD）121と、このレーザ・ダイオード121からの信号光に対して強度変調などの所要の変調処理を施す変調部122をそなえて構成される。

【0047】そして、本実施形態では、これらの各信号光送信部12-1~12-4iが、奇数チャンネルグループ〔奇数チャンネルの信号光用信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-(4i-1)〕と偶数チャンネルグループ（偶数チャンネルの信号光用信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12-4i）とに分割されている。

【0048】また、各合波器13-1~13-6, 16は、それぞれ入力される複数の信号光を合波することにより各信号光送信部12-1~12-4iからの信号光を波長多重するものであるが、本実施形態では、各チャンネルの信号光送信部12-1~12-4iからの各信号光の直線偏光を保持したまま信号光を伝搬させるとともに、各信号光の直線偏光を保持したまま信号光を合波するために、例えば、偏波保持ファイバ、定偏波合波器が用いられている。なお、この定偏波合波器には、上述の偏波保持ファイバを融着して形成される融着型偏波カプラやPBSと呼ばれるバルク型の定偏波合波器などが広く用いられている。

【0049】図10は融着型偏波カプラの一種である1:1分岐定偏波カプラの特性の一例を示す図で、この図10に示すように、1:1分岐定偏波カプラでは、入力ポート1の軸に合わせて（0度の方位で）直線偏光を入力した場合には偏波状態が保持され、出力ポート1及び出力ポート2に0度の直線偏光が出力される一方、入力ポート1の軸に対して直線偏光を90度回転させて入力した場合には、出力ポート1及び出力ポート2に90度の直線偏光が出力される。

【0050】また、同様に、入力ポート2の軸に対し直線偏光を0度の方位で出力した場合には出力ポート1及び出力ポート2に0度の直線偏光が、入力ポート2の軸に対し直線偏光を90度の方位で入力した場合には出力ポート1及び出力ポート2に90度の直線偏光が出力される。ここで、例えば、入力ポート1に直線偏光S1を、入力ポート2にS2を入力した場合、入力する偏光方位を0度もしくは90度を選ぶことにより、次表2に示すように、S1, S2の直交関係を選択することが可

能である。本実施形態の各合波器13-1~13-6, \*現されている。  
16は、それぞれこのような1:1分岐融着型偏波カプ 【0051】  
ラを最小単位として、これを組み合わせることにより実 \* 【表2】

入力偏光方位と出力状態

S1の入力方位	S2の入力方位	S3の入力方位
0度	0度	S1 // S2
0度	90度	S1 ⊥ S2
90度	0度	S1 ⊥ S2
90度	90度	S1 // S2

【0052】ところで、波長多重された信号光伝送時の FWMやXPMなどの非線形光学効果の影響は、2つの信号光(2チャンネル分の信号光)を考えた場合、これら2チャンネル分の信号光の偏光状態が直交する時に最小となり、平行となる時に最大となる。従って、2つの信号光の偏光状態が常に直交するように偏波スクランブルをかければ、このような非線形光学効果の影響を緩和することが可能である。

【0053】そこで、本実施形態における偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置は、上述のような合波器13-1~13-6, 16の特性を利用して、奇数チャンネルグループの信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(4i-1)のうちの一部の信号光送信部1-1, 1-5, ..., 1-(4i-3)からの信号光の偏光方位P1と、残りの信号光送信部1-3, 1-7, ..., 1-(4i-1)からの信号光の偏光方位P2とがそれぞれ直交する偏光方位(つまり、P1⊥P2)となるように構成され、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部1-2, 1-4, ..., 1-4iのうちの一部の信号光送信部1-2, 1-6, ..., 1-(4i-2)からの信号光の偏光方位P1'と、残りの信号光送信部1-4, 1-8, ..., 1-4iからの信号光の偏光方位P2'とがそれぞれ直交する偏光方位(P1'⊥P2')となるように構成されている。

【0054】なお、上述の偏光方位P1, P2及び偏光方位P1', P2'は、それぞれ必ずしも上述のごとく直交させる必要はなく、所要量異なるようにしてもよい。さて、次に、上述の各偏波スクランブラ14-1, 14-2のうち、一方の偏波スクランブラ(第3偏波スクランブラ)14-1は、発振器15-1から供給される周波数f1(第3周波数)の信号を受けることにより、奇数チャンネルグループの信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-(4i-1)からの信号光に対して、周波数f1で偏波スクランブルを施すものであり、他方の偏波スクランブラ(第4偏波スクランブラ)14-2は、発振器15-2から供給される周波数f2(第4周波数)を受けることにより、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12-4iからの信号光に対して、周波数f1とは異なる

周波数f2で偏波スクランブルを施すものである。

【0055】ところが、ここで、各偏波スクランブラ14-1, 14-2は、前述のように、2つの信号光の偏光状態が常に直交するように偏波スクランブルをかける必要があるため、この偏波スクランブラ14-1, 14-2には、例えば、図9に示すような、位相変調器型の偏波スクランブラが用いられる。すなわち、この図9に示すように、各偏波スクランブラ14-1, 14-2は、それぞれリチウムニオブ(LiNb)の酸化物にチタン(Ti)被膜を形成した導波管141, LiNbO<sub>3</sub>導波路142, 発振器15-1(又は、15-2)からの信号をLiNbO<sub>3</sub>導波路142に沿って伝達する電極143, 144を有して構成される。

【0056】そして、この位相変調器型の偏波スクランブラ14-1, 14-2では、入力される信号光の偏光状態が、発振器15-1(又は15-2)による印加電界を変化させることにより変調されるようになっており、例えば、2波(信号光)の直線偏光をLiNbO<sub>3</sub>導波路142に対してそれぞれ45度と135度の方向に直交させて入射した場合には、一方の信号光が45度直線偏光→右回り円偏光→135度直線偏光→左回り円偏光→45度直線偏光→右回り円偏光→135度直線偏光という変化を示す。すなわち、2つの信号光は、互いに直交関係を保ったまま偏波状態がスクランブルされるようになっている。なお、図9中、R1は電極143, 144用の終端抵抗である。

【0057】以下、上述のごとく構成された偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の動作について詳述する。まず、奇数チャンネルグループの信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-(4i-1)からの信号光が、一部の信号光送信部12-1, 12-5, ..., 12-(4i-3)からの信号光の偏光状態P1と、残りの信号光送信部12-3, 12-7, ..., 12-(4i-1)からの信号光の偏光状態P2とが相互に直交した状態で、合波器13-1, 13-2, 13-5により波長多重されたのち、偏波スクランブラ14-1に入力される。

【0058】つまり、奇数チャンネルグループの信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-(4i-

1) からの信号光は、短波長側（又は長波長側）から数えて  $4i-3$  (1, 5, 9...) 番目の信号光の偏光状態  $P1$  と、 $4i-1$  (3, 7, 11...) 番目の信号光の偏光状態  $P_2$  とが相互に直交した状態 ( $P1 \perp P2$ ) で偏波スクランブラ 14-1 に入力される。

【0059】一方、偶数チャンネルグループの信号光送信部 12-2, 12-4, ..., 12-4i からの信号光は、一部の信号光送信部 12-2, 12-6, ..., 12-(4i-2) からの信号光の偏光状態  $P1'$  と、残りの信号光送信部 12-4, 12-8, ..., 12-4i からの信号光の偏光状態  $P2'$  とが相互に直交した状態で、合波器 13-3, 13-4, 13-6 により波長多重されたのち、偏波スクランブラ 14-2 に入力される。

【0060】つまり、偶数チャンネルグループの信号光送信部 12-2, 12-4, ..., 12-4i からの信号光は、短波長側（又は長波長側）から数えて  $4i-2$  (2, 6, 10...) 番目の信号光の偏光状態  $P1'$  と、 $4i$  (4, 8, 12...) 番目の信号光の偏光状態  $P2'$  とが相互に直交した状態 ( $P1' \perp P2'$ ) で、偏波スクランブラ 14-2 に入力される。

【0061】これにより、偏波スクランブラ 14-1 では、発振器 15-1 からの信号（周波数  $f1$ ）に応じて、波長多重された奇数チャンネルグループからの各信号光のうち、一部の信号光送信部 12-1, 12-5, ..., 12-(4i-3) からの各信号光と、残りの信号光送信部 12-3, 12-7, ..., 12-(4i-1) からの各信号光との信号対に対して、それぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルが施される。

【0062】一方、偏波スクランブラ 14-2 では、波長多重された偶数チャンネルグループからの各信号光のうち、一部の信号光送信部 12-2, 12-6, ..., 12-(4i-2) からの各信号光と、残りの信号光送信部 12-4, 12-8, ..., 12-4i からの各信号光との信号対に対して、それぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルが施される。

【0063】なお、このとき同時に、偏波スクランブラ 14-1 では、奇数チャンネルグループからの各信号光に対して、それぞれ同一の周波数  $f1$  で偏波スクランブルが施される一方、偏波スクランブラ 14-2 では、偶数チャンネルグループからの各信号光に対して、偏波スクランブラ 14-1 での偏波スクランブル周波数  $f1$  とは異なる周波数  $f2$  で偏波スクランブルが施されている。

【0064】つまり、偏波スクランブラ 14-1 では、発振器 15-1 からの信号（周波数  $f1$ ）に応じて、波長多重された奇数チャンネルグループからの信号光対に対して、それぞれ直交する偏光方位であって且つ同一の周波数  $f1$  で偏波スクランブルが施されるとともに、偏波スクランブラ 14-2 では、波長多重された偶数チャ

ネルグループからの信号光対（他のチャンネルの信号光対）に対して、それぞれ直交する偏光方位であって且つ上記の周波数  $f1$  とは異なった周波数  $f2$  で偏波スクランブルが施される。

【0065】この結果、各信号光送信部 1-1~1-4i からの波長多重された信号光（各チャンネル  $ch. 1 \sim ch. 4i$  毎の信号光）は、例えば、図 11 に示すように、その偏光方位、周波数がそれぞれ隣接チャンネルの信号光の偏光方位、周波数とは相互に異なった状態で偏波スクランブルを施されて伝送される。従って、波長多重信号伝送時の  $ch. 4i$  の信号光と  $ch. 4i-2$  の信号光、及び  $ch. 4i-3$  の信号光と  $ch. 4i-1$  の信号光とによる FWM や XPM などの非線形光学効果の影響がそれぞれ最小となるとともに、奇数チャンネルグループと偶数チャンネルグループからの 2 種類の信号光対の偏光状態の相対関係が「 $f2-f1$ 」の周期で変化し、非線形光学効果の影響が、さらに 2 種類の信号光の偏光状態が直交する場合と平行となる場合の中間的な状態に平均化されて抑制される。

【0066】例えば、 $f1=5\text{GHz}$ ,  $f2=6\text{GHz}$  とした場合には、 $6\text{GHz}-5\text{GHz}=1\text{GHz}$  の周期で偏光状態の相対関係が変化する。これは、距離に換算して 0.3m 周期での偏光状態変化に相当するため、数千 km におよぶ波長多重信号の伝送時にも、十分な平均化が施される。このように、本実施形態における偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、隣接チャンネルの信号光の偏光状態をそれぞれ相互に直交する（異なる）状態にして偏波スクランブルを施すので、波長多重信号の伝送時に生じる FWM（四光子混合波信号）などの非線形光学効果を最小限に抑制して、波長多重信号の伝送品質（SNR）を安定させて大幅に向上させることができ、波長多重度の高密度化（伝送帯域の有効利用）、伝送路の長距離化などに大いに寄与する。

【0067】また、本装置では、多数の信号光送信部 12-1~12-4i に対して、2つの偏波スクランブラ 14-1, 14-2 だけを設けるという簡素な構成で、有効に非線形光学効果を抑制することができる。なお、上述の各偏波スクランブラ 14-1, 14-2 は、後述するように、それぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、現用偏波スクランブラが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性も大幅に向上する。

【0068】(b) 第 2 実施形態の説明

図 12 は本発明の第 2 実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図であるが、この図 12 においても、12-1~12-m ( $m$  は自然数) はそれぞれ 1~m チャンネル用の信号光送信部、13-1~13-3 はそれぞれ 1:1 分岐定偏波カプラを用いて構成された合波器、14-1 は偏波スクラ

ンプラ、15-1は偏波スクランブラ14-1用の偏波スクランブル周波数 $f_1$ の信号を出力する発振器である。

【0069】そして、本実施形態では、例えば、各信号光送信部12-1~12-mが、一部の信号光送信部12-1~12-j（ただし、 $j < m$ ）からなるグループ1（G1）と、残りの信号光送信部12-（j+1）~12-mからなるグループ2（G2）とに分割され、さらに、第1実施形態と同様に、合波器13-1~13-3を用いることにより、G1の信号光送信部12-1~12-jとG2の信号光送信部12-（j+1）~12-mとでそれぞれ直交する偏光方位（ $P1 \perp P2$ ）となるように構成されるとともに、各信号光送信部12-1~12-mからの信号光に対しては、偏波スクランブラ14-1により、発振器15-1からの同一の周波数 $f_1$ （信号）で偏波スクランブルが施されるようになっている。

【0070】なお、本実施形態においても、この偏波スクランブラ14-1は、2つの信号光の偏光状態が常に直交するように偏波スクランブルをかけるために、図9により前述したものと同様の構成を有している。上述のごとく構成された偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、まず、波長多重すべき $m$ チャンネル分の信号光送信部12-1~12-mからの信号光のうち、G1の信号光送信部12-1~12-jからの各信号光がそれぞれ同一の偏光状態 $P1$ となるように合波器13-1で合波されるとともに、G2の信号光送信部12-（j+1）~12-mからの各信号光がそれぞれ同一の偏光状態 $P2$ となるように合波器13-2で合波される。

【0071】この結果、G1からの各信号光の偏光状態 $P1$ と、G2からの各信号光の偏光状態 $P2$ とが相互に直交した状態で各信号光が偏波スクランブラ14-1に入力され、一括して偏波スクランブルが施される。つまり、本実施形態における装置では、波長多重された複数チャンネルの信号光のうち、G1の信号光送信部12-1~12-jからの各信号光と、G2の信号光送信部12-（j+1）~12-mからの各信号光とに対し、偏波スクランブラ14-1によりそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルが施されるので、隣接チャンネルの偏光状態を常に直交する（異なる）状態にして、波長多重信号を伝送することができる。

【0072】従って、この場合も、隣接チャンネルの信号光から受ける影響を大幅に削減でき、これにより、波長多重信号の伝送時に生じるFWMやXPMなどの非線形光学効果の影響を確実に抑制して、波長多重信号の伝送品質を大幅に向上させることができる。また、このとき、G1の信号光送信部12-1~12-jからの各信号光と、G2の信号光送信部12-（j+1）~12-mからの各信号光とに対し、偏波スクランブラ14-1によりそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルが

施されるので、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施さなくとも、同一の周波数 $f_1$ で偏波スクランブルを施せばよいので、より簡単に、隣接チャンネルの信号光により生じる非線形光学効果の影響を確実に抑制して、波長多重信号の伝送品質を大幅に向上させることができる。

【0073】なお、本実施形態においても、上述の偏光方位 $P1$ 、 $P2$ は、必ずしも上述のごとく直交させる必要はなく、所要量異なるようにしても、十分、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる非線形光学効果の影響を抑制できる。

（c）第3実施形態の説明

図13は本発明の第3実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で、この図13においても、12-1~12-m（ $m$ は自然数）はそれぞれ1~ $m$ チャンネル用の信号光送信部、13-1~13-3はそれぞれ1:1分岐定偏波カプラを用いて構成された合波器、14-1は偏波スクランブラ、15-1は偏波スクランブラ14-1用の偏波スクランブル周波数 $f_1$ の信号を出力する発振器である。

【0074】そして、本実施形態では、例えば、各信号光送信部12-1~12-mが、奇数チャンネル（ch. 1, 3, 5, ...,  $2i-1$ ： $i$ は自然数）用の信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-（ $2i-1$ ）のグループ（奇数チャンネルグループ）と、偶数チャンネル（ch. 2, 4, 6, ...,  $2i$ ）用の信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12- $2i$ のグループ（偶数チャンネルグループ）とに分割されている。

【0075】つまり、この図13に示す装置は、図12により前述した装置におけるグループ1（G1：一部の信号光送信部）を奇数チャンネルの信号光用信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-（ $2i-1$ ）として構成するとともに、グループ2（G2：残りの信号光送信部）を偶数チャンネルの信号光用信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12- $2i$ として構成されている。

【0076】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送では、波長多重された1~ $m$ チャンネル分の信号光のうち、短波長側（又は、長波長側）から数えて奇数番目の各信号光（信号光送信部12-1, 12-3, ..., 12-（ $2i-1$ ）からの各信号光）がそれぞれ同一の偏光状態 $P1$ となるように合波器13-1で合波されるとともに、短波長側（又は、長波長側）から数えて偶数番目の信号光（信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12- $2i$ からの各信号光）がそれぞれ同一の偏光状態 $P2$ となるように合波器13-2で合波される。

【0077】その後、各合波器13-1, 13-2で合波された各信号光は、それぞれ偏光状態 $P1$ と偏光状態



P2とが相互に直交した状態( $P1 \perp P2$ )を保って偏波スクランブラ14-1に入力されて、偏波スクランブラ14-1により周波数f1で一括して偏波スクランブルが施される。なお、このとき、各信号光の光スペクトルとチャンネル配置は、例えば、図14に示すようになり、隣接チャンネル(ch. 2jとch. 2k-1:ただし、j, kはそれぞれ自然数)の信号光の偏光状態が相互に異なる(直交する)状態となる。

【0078】このように、本実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、FWMやXPMなどの非線形光学効果の影響が最も大きくなる隣接チャンネル間の偏光状態P1, P2を直交させることができるので、図12により前述した装置に比して、より有効に波長多重信号伝送時の非線形光学効果を抑制して、波長多重信号の伝送品質を向上させることができる。

【0079】なお、本実施形態においても、上述の偏光方位P1, P2は、必ずしも上述のごとく直交させる必要はない。

#### (d) 第4実施形態の説明

図15は本発明の第4実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図であるが、この図15に示す装置は、図13により前述した偏波スクランブラ14-1が現用偏波スクランブラ14W-1と予備用偏波スクランブラ14P-1をそなえて二重化され、さらに、各信号光送信部12-1~12-2iが現用信号光送信部12W-1~12W-2iと予備用信号光送信部12P-1~12P-2iとをそなえて二重化されることにより、各チャンネルch. 1~ch. 2iが現用チャンネルch. 1(W)~ch. 2i(W)と予備用チャンネルch. 1(P)~ch. 2i(P)とに二重化されている。

【0080】なお、この場合は、合波器13-7として、図10により前述したような特性を有する1:1分岐定偏波カプラには必ず2つの出力ポートが存在することから、これを用いて上述のような二重化(冗長構成)を実現している。また、15W-1, 15P-1はそれぞれ現用、予備用の発振器、18W, 18Pはそれぞれ現用、予備用の光増幅器である。

【0081】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、各光増幅器18W, 18Pが非動作状態においては信号光を遮断するスイッチの役割を果たし、動作時にはポストアンプとしての役割を果たす。見方を変えれば、ポストアンプ(光増幅器18W)自信も冗長となる。つまり、現用偏波スクランブラ14W-1と予備用偏波スクランブラ14P-1との切り替えと、現用信号光送信部12W-1~12W-2iと予備用信号光送信部12P-1~12P-2iとの切り替えを連動させることにより、信頼度の低い能動部品で構成された部分を冗長することが可能になる。

【0082】従って、現用偏波スクランブラ14W-1や現用信号光送信部12W-1~12W-2iが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラ14P-1, 予備用信号光送信部12P-1~12P-2iにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性が大幅に向上する。なお、図15において、現用偏波スクランブラ14W-1, 予備用偏波スクランブラ14P-1, 現用発振器15W-1, 予備用発振器15P-1, 現用ポストアンプ18W, 予備用ポストアンプ18P, 合波器13-8からなる破線で囲んだ部分は、例えば、図16に示すように、現用偏波スクランブラ14W-1, 予備用偏波スクランブラ14P-1, 現用発振器15W-1, 予備用発振器15P-1, 光スイッチ部19をそなえて構成しても、光スイッチ部19の切り替えにより、現用偏波スクランブラ14W-1や現用信号光送信部12W-1~12W-2iが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラ14P-1, 予備用信号光送信部12P-1~12P-2iにより処理を継続することができる。

【0083】なお、このように、各信号光送信部12-1~12-2iを二重化することや、偏波スクランブラ14-1を二重化することは、本実施形態のみならず、前述の第1~第3実施形態及び後述する第5~第7実施形態においても適用できる。

#### (e) 第5実施形態の説明

図17は本発明の第5実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で、この図17においても、12-1~12-m(mは自然数)は複数チャンネルch. 1~ch. m用の信号光送信部で、それぞれ第1実施形態にて前述したものと同様に、レーザ・ダイオード(LD)121と変調部122とをそなえて構成されている。また、13は第1実施形態にて前述したものと同様の合波器、14-1~14-mはそれぞれ偏波スクランブラ、15-1~15-mはそれぞれ偏波スクランブラ用の発振器である。

【0084】ここで、各偏波スクランブラ14-1~14-mは、それぞれ対応する発振器15-1~15-mからの偏波スクランブル用の信号(周波数f1~f m)を受けることにより、各信号光送信部12-1~12-mからの信号光に対してそれぞれ異なる周波数f1~f mで偏波スクランブルを施すものである。このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重されたmチャンネル分の全ての信号光に対して、各偏波スクランブラ14-1~14-mによってそれぞれ異なる周波数f1~f mで偏波スクランブルが施されたのち、全チャンネル1~m分の各信号光は合波器13で合成されて出力される。

【0085】この結果、波長多重された各信号光は、その偏光状態の相対関係が周期的に変化し、偏光状態の相対関係が全信号光で平均化されて、波長多重信号伝送時

のFWMやXPMなどの非線形光学効果の影響が抑制される。なお、図18は各信号光のスペクトルとチャンネル配置の一例を示す図である。以下、このように各信号光に対して異なった周波数 $f_1 \sim f_m$ で偏波スクランブルを施すことによって、偏光状態の相対関係が全信号光で平均化されることについて詳述する。

【0086】WDM(波長多重)システム中で発生する信号光間のFWMの発生効率は、光ファイバの非線形定数、入力光パワー、零分散波長と信号光波長との差などに依存するが、その他に、信号光の偏光方向にも依存する。例えば、3種類の波長の異なる信号光が光ファイバ中で非線形相互作用することにより発生するFWMの発生効率は、3つの信号光がすべて同じ偏光方位である時を「1」とすると、各信号光のそれぞれが任意の偏光方位にあるときの発生効率の平均値は $3/8$ と削減されることが分かっている。

【0087】そこで、上述のように、波長多重された各信号光のそれぞれに対して、偏波スクランブラ14-1 $\sim$ 14-mで異なった周波数 $f_1 \sim f_m$ で偏波スクランブルを施すことにより、各信号光がそれぞれ異なった偏光方位(偏光状態)に設定され、さらに、各偏波スクランブラ14-1 $\sim$ 14-mにより各信号光の偏光方位が回転するように調整すれば、伝送路のあらゆる場所での偏光状態が偏波スクランブル周期よりも十分長い距離(時間)において平均化される。

【0088】つまり、このように波長多重信号光のそれぞれに施す偏波スクランブルをそれぞれ異なった周期(周波数)で行なうことにより、ある時点で、FWMが大きく発生してしまう組み合わせの信号光の偏光状態が一致したとしても、次の瞬間にはその偏光状態が異なった状態となり、スクランブル周期よりも十分長い時間(距離)では、各信号光の偏光状態の組み合わせを平均化してFWMの発生効率を減少させることができるのである。

【0089】なお、このとき、各偏波スクランブラ14-1 $\sim$ 14-mでは、例えば、図19(a) $\sim$ (e)に示すように、各信号光に $B/2$ ( $B$ :ビットレート)以上の周波数 $f_1 \sim f_m$ で偏波スクランブルを施すことにより、信号の1ビット中で相互作用する光の偏光(偏波)状態が平均化され、信号光間のFWMの発生効率が抑圧される。

【0090】また、この場合、スクランブル周波数 $f_1 \sim f_m$ として取りうる周波数値として、「0(無変調)」を加えることができる。つまり、例えば、図17に示す構成において、偏波スクランブラ14-1を省略して、各信号光送信部12-1 $\sim$ 12-mの少なくとも一部の信号光送信部12-2 $\sim$ 12-mからの信号光に対してそれぞれ異なる周波数 $f_2 \sim f_m$ ( $m > 2$ の場合)、または周波数 $f_2$ ( $m = 2$ の場合)で偏波スクランブルが施されるようにしても、十分、FWMの発生効

率を抑制することができる。ただし、この場合、隣接チャンネルの信号光の偏波スクランブル周波数は異なる値にしなければならない。

【0091】なお、このように、スクランブル周波数 $f_1 \sim f_m$ として取りうる周波数値として、「0(無変調)」を加えることは、本実施形態のみではなく、前述の第1 $\sim$ 第4実施形態及び後述する第6、第7実施形態においても適用することができる。このように、本実施形態における偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、波長多重された $m$ チャンネル分の信号光に対して、それぞれ異なる周波数 $f_1 \sim f_m$ で偏波スクランブルを施すことにより、各信号光の偏光状態の相対関係を全信号光で平均化して、波長多重信号を伝送するので、波長多重信号伝送時のFWMやXPMなどの非線形光学効果の影響を有効に抑制することができる。

【0092】従って、波長多重信号の伝送品質を大幅に向上させることができ、これにより、波長多重度の高密度化(伝送帯域の有効利用)、伝送路の長距離化に大いに寄与する。さて、ところで、FWMの発生効率が最も高い信号光の組み合わせは、信号光の光周波数差が小さい場合、すなわち、隣接チャンネルの信号光同士の相互作用が最も伝送特性に影響を与える。そこで、隣接チャンネルの信号光同士の偏波スクランブル周波数はなるべく大きく異なる組み合わせが良い。ここで、偏波スクランブルの動作範囲はせいぜい数十GHzであるので、取りうるスクランブル周波数は数種類である。これを隣接チャンネルの信号光同士でなるべく離れた値になるように組み合わせる。

【0093】今、取りうるスクランブル周波数が $f_n = B/2 \times n$ (ただし、 $n = 1 \sim 5$ )の5種類である仮定すると、例えば、図20に示すように、各信号光の波長( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ )に対してスクランブル周波数をそれぞれ $f_1, f_4, f_2, f_5, f_3, f_1, \dots$ のように設定すれば、隣接チャンネルの信号光に対するスクランブル周波数は必ず $B$ (ビットレート)以上異なり、且つ、同じ周波数の信号光も $5 \times \Delta\lambda$ (ただし、 $\Delta\lambda$ は信号波長間隔)離れた場所に現れるので、FWMの発生効率をさらに有効に抑制することができる。

【0094】ここで、基本となるスクランブル周波数が $f_n = B/2$ としたことについて、簡単に説明する。例えば、2本の信号光(2チャンネル分の信号光)を考えた場合、FWMなどの非線形光学効果はこれら2信号光の偏波状態が、平行状態か直交状態かで、発生効率が最大、最小になり、それ以外の偏波状態では、偏波の揃い方により発生効率が変わるので、2信号光のパルスが同時に立ち上がり、立ち下がる場合、1信号光の偏波が一定であるとする、他のパルスの偏波がパルス内で平行状態から直交状態に変化した場合に、1タイムスロット内での偏波が平均化されたことになる。



【0095】従って、1タイムスロット内で半周期偏波が回転するスクランブル周波数( $B/2$ )は、FWMの発生効率低減に効果的で、これを偏波スクランブル基本周波数とすることが有効である。また、前述の各実施形態にて前述したように、隣接チャンネルの信号光同士の偏光方位を直交させることは非常に有効である。すなわち、隣接チャンネルの信号光の偏波スクランブル周波数は同じ周波数であっても偏光方位が常に直交していれば、この2波によるFWMの発生効率は理論的には(偏波分散がない理想的なファイバ中で)零になる。従って、最もFWMの発生効率が高い組み合わせの信号光同士による発生効率を零にできれば、FWMの影響を大幅に低減することができる。

【0096】例えば、伝送路の偏波分散による影響が小さい場合、即ち偏波分散の小さい伝送路を用いるか、偏波分散があまり効かない数100キロ程度のシステムでは、偏波スクランブラへの入射光の偏波を $+45^\circ$ 、 $-45^\circ$ とする、あるいは変調印加用電気信号の位相を $180^\circ$ ずらすなどして、伝送路の送信側で偏波の向きを隣接チャンネルの信号光同士で相互に直交するように入射し、ビットレート( $B$ )程度の同一周波数で偏波スクランブルを行なえば、各信号光の偏光方位を伝送中ほぼ一定して直交状態に保つことができるので、FWM発生効率の最も高い組み合わせである隣接チャンネルの信号光同士の相互作用をほとんど除去でき、FWMの影響を大幅に低減することができる。

【0097】しかし、このように隣接チャンネルの信号光の偏波状態を直交させた場合でも、周波数が同じ場合にはさらにその外側にある信号との偏波は一致してしまい、波長間隔に見合っただけの四光子混合が発生してしまう。そこで、例えば、図21に示すように、偏光状態を直交状態に設定した2つの信号光( $\lambda_2$ と $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ と $\lambda_5$ など)を1組とし、これらを図20に示すような組み合わせで波長配置すれば、隣接チャンネルの信号光以外の組み合わせによるFWMの発生効率をも低減することができる。

【0098】また、偏波スクランブルとは位相変調(周波数変調)を行なっていることと同意であるので、偏波スクランブルを行なうことにより、例えば、図22に示すように、各信号光のスペクトルが広がる。従って、発生するFWMのスペクトルも広がってしまうが、このとき、スクランブル周波数がビットレート( $B$ )程度であれば、図23に示すように、その一部が受信フィルタの帯域から外れるので、受信器に入力するFWMによる雑音成分を低減させることができる。

【0099】(f)第6実施形態の説明

図24は本発明の第6実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で、この図24においても、 $12-1 \sim 12-N$ ( $N$ は自然数)はそれぞれ波長多重されるべき複数のチャンネル

( $ch. 1 \sim ch. N$ )用の信号光を生成して出力する信号光送信部、 $13-1 \sim 13-M$ (ただし、 $M < N$ )、 $16$ はそれぞれ入力信号光を合波して波長多重する合波器、 $14-1 \sim 14-M$ はそれぞれ偏波スクランブラ、 $15-1 \sim 15-M$ はそれぞれ各偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ 用の発振器で、それぞれ異なる周波数 $f_1 \sim f_M$ の信号を発振するようになっている。

【0100】そして、本実施形態では、図24に示すように、各信号光送信部 $12-1 \sim 12-N$ が、信号光送信部 $12-1 \sim 12-i$ (ただし、 $i < N$ )からなるグループ1( $G_1$ )、信号光送信部 $12-(i+1) \sim 12-j$ (ただし、 $i+1 < j < N$ )からなるグループ( $G_2$ )、 $\dots$ 、信号光送信部 $12-k \sim 12-N$ (ただし、 $j < k < N$ )からなるグループ $M$ ( $G_M$ )の複数のグループ( $G_1 \sim G_M$ )に分割され、各偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ によって、それぞれ異なる周波数 $f_1 \sim f_M$ で偏波スクランブルが施されるようになっている。

【0101】つまり、1グループからの信号光対に対しては、それぞれ対応する偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ により同一の周波数で偏波スクランブルが施されるが、異なったグループからの信号光対に対しては、各偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ 毎にそれぞれ異なった周波数 $f_1 \sim f_M$ で偏波スクランブルが施されるようになっている。

【0102】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重された $N$ チャンネル分の信号光が $G_1 \sim G_M$ 毎に数チャンネルずつの単位でそれぞれ各合波器 $13-1 \sim 13-M$ で合波され、各偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ により、同一グループからの信号光に対しては同一の周波数で偏波スクランブルが施されるとともに、異なるグループからの信号光に対してはそれぞれグループ単位毎に異なる周波数 $f_1 \sim f_M$ で偏波スクランブルが施されたのち、全チャンネル分が合波器 $16$ で合波されて出力される。

【0103】従って、図17により前述した装置に比して、偏波スクランブラの数を $m$ 個から $M$ 個に削減して、より簡素な構成で、各信号光の偏光状態の相対関係を全信号光で平均化して、波長多重信号伝送時の非線形光学効果の影響を抑制し、波長多重信号の伝送品質を向上させることができる。なお、本実施形態においても、図15により前述したように、各偏波スクランブラ $14-1 \sim 14-M$ はそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、本装置の信頼性を大幅に向上させることができる。

【0104】(g)第7実施形態の説明

図25は本発明の第7実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で、この図25においても、 $12-1 \sim 12-2i$ ( $i$ は自然数)はそれぞれ波長多重されるべき複数のチャンネル

(ch. 1 ~ ch. 2 i) 用の信号光を生成して出力する信号光送信部、13-1, 13-3はそれぞれ入力信号光を合波して波長多重する合波器、14-1, 14-2はそれぞれ偏波スクランブラ、15-1, 15-2はそれぞれ各偏波スクランブラ14-1, 14-2用の発振器で、この発振器15-1, 15-2はそれぞれ異なる周波数 $f_1$ ,  $f_2$ の信号を発振するようになっている。

【0105】そして、本実施形態では、各信号光送信部12-1 ~ 12-2 iが奇数チャンネル(ch. 1, 3, ..., 2i+1)の信号光のグループ(信号光送信部1-1, 1-3, ..., 1-(2i-1))と、偶数チャンネル(ch. 2, 4, ..., 2i)の信号光のグループ(信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12-2i)とに分割されている。

【0106】つまり、本実施形態では、図24により上述した装置における複数の信号光送信部12-1 ~ 12-2 iを奇数チャンネルのグループと偶数チャンネルのグループとに分割するとともに、複数の偏波スクランブラ14-1 ~ 14-Mを、2つの偏波スクランブラ14-1', 14-2'として構成している。ここで、偏波スクランブラ(第1偏波スクランブラ)14-1'は、奇数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部12-1, 12-3, ..., 1-(2i+1)からの信号光に対して、周波数 $f_1$ (第1周波数)で偏波スクランブルを施すものであり、偏波スクランブラ(第2偏波スクランブラ)14-2'は、偶数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12-2iからの信号光に対して、上記の周波数 $f_1$ とは異なる周波数 $f_2$ (第2周波数)で偏波スクランブルを施すものである。

【0107】このような構成により、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置では、波長多重された複数のチャンネル(ch. 1 ~ ch. 2 i)の信号光のうち、短波長側(又は、長波長側)から数えて奇数番目の信号光、つまり、信号光送信部12-1, 12-3, ..., 1-(2i+1)からの信号光が合波器13-1で合波されたのち、一方の偏波スクランブラ14-1'によりそれぞれ同一の周波数 $f_1$ で偏波スクランブルが施される。

【0108】一方、短波長側(又は、長波長側)から数えて偶数番目の信号光、つまり、信号光送信部12-2, 12-4, ..., 12-2iからの信号光は合波器13-2で合波されたのち、他方の偏波スクランブラ14-2'によりそれぞれ周波数 $f_1$ と異なる周波数 $f_2$ で偏波スクランブルが施される。その後、各偏波スクランブラ14-1', 14-2'から出力される全チャンネル分の各信号光は、合波器13-3で合波されたのち波長多重信号として出力される。なお、図26は各信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図で

ある。

【0109】つまり、上述の装置では、複数の信号光送信部12-1 ~ 12-2 iを奇数チャンネルの信号光のグループと偶数チャンネルの信号光のグループとに分割することで、隣接チャンネルの信号光の周波数を一定周波数だけ異なった状態(偏光状態)にしておき、さらに、各偏波スクランブラ14-1', 14-2'によって奇数チャンネルグループからの信号光と偶数チャンネルグループからの信号光とに対してそれぞれ異なる周波数 $f_1$ ,  $f_2$ で偏波スクランブルを施すことによって、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互により大きく異なった状態にすることができるのである。

【0110】このように、本実施形態における偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、複数の信号光送信部12-1 ~ 12-2 iを奇数チャンネルの信号光のグループと偶数チャンネルの信号光のグループとに分割して、異なるグループ毎にそれぞれ異なった周波数 $f_1$ ,  $f_2$ で偏波スクランブルを施すので、FWMやXPMなどの非線形光学効果の影響が最も大きくなる隣接チャンネルの各信号光に対して、その偏光状態の相対関係を変化させて平均化することができ、図24により前述した装置に比して、さらに効果的に、波長多重信号の伝送品質を向上させることができる。

【0111】また、この場合は、図24に示す装置に比して、2つの偏波スクランブラ14-1', 14-2'のみを用いればよいので、より簡素な構成で、上述のような効果が得られる。なお、本実施形態においても、各偏波スクランブラ14-1'及び14-2'は、図15により前述したように、それぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、本装置の信頼性も大幅に向上する。

【0112】

【発明の効果】以上詳述したように、本発明の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法によれば、波長多重された複数のチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すことにより、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互に異なる状態にして(相互関係を変化させて)、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる影響を平均化したのち、波長多重信号を伝送することができるので、波長多重信号伝送時に、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる影響を大幅に削減できる。従って、特に、波長多重信号伝送時に生じる四光子混合波信号などの非線形光学効果を効率的に抑制して、波長多重信号の伝送特性を大幅に向上させることができ、これにより、波長多重度の高密度化(伝送帯域の有効利用)、伝送路の長距離化に大いに寄与する(請求項1)。

【0113】なお、このとき、上記の波長多重された複数のチャンネルの全てのチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施せば、より確

実に、隣接チャンネルの信号光の偏光状態の相互関係を変化させて非線形光学効果の影響を平均化して削減することができるが（請求項2）、少なくとも一部のチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数または所定の周波数で偏波スクランブルを施しても、十分、非線形光学効果の影響を削減できる（請求項3）。

【0114】また、着目チャンネルの信号光に所定周波数で偏波スクランブルを施した場合、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接する隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差が、着目チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数と着目チャンネルの信号光に隣接しない非隣接チャンネルの信号光に対して施す偏波スクランブルの周波数との周波数差よりも大きくなるように設定すれば、隣接チャンネルの信号光の偏光状態をさらに相互に大きく異なる状態にできるので、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる非線形光学効果の影響をさらに大幅に削減して、波長多重信号の伝送品質を向上させることができる（請求項4）。

【0115】さらに、本発明の偏波スクランブル式波長多重信号伝送方法によれば、波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる偏光方位で偏波スクランブルを施すことにより、隣接チャンネルの偏光状態を所要量異なる状態にして、波長多重信号を伝送することができるので、この場合も、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる非線形光学効果の影響を大幅に削減でき、波長多重信号の伝送品質を大幅に向上させることができる（請求項5）。

【0116】また、このとき、上記の波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施さなくとも、同一の周波数で偏波スクランブルを施せば、隣接チャンネルの偏光状態を所要量異なる状態にして、波長多重信号を伝送することができるので、より簡単に、非線形光学効果の影響を減少させることができる（請求項6）。

【0117】なお、このとき、上記の波長多重された複数チャンネルの信号光のうちのある一対のチャンネルの信号光に対しては、それぞれ異なる偏光方位であって且つ同一の周波数で偏波スクランブルを施すとともに、上記の波長多重された複数チャンネルの信号光のうち他の一対のチャンネルの信号光に対しては、それぞれ異なる偏光方位であって且つ上記ある一対のチャンネルの信号光に対して施す周波数とは異なった周波数で偏波スクランブルを施せば、さらに、各信号光送信部からの各信号光の偏光状態を相互に大きく異なる状態にできるので、より効率的に、非線形光学効果の影響を減少させることができる（請求項7）。

【0118】また、具体的に、上述の異なる偏光方位として、相互に直交する偏光方位を選べば、最も有効に、

隣接チャンネルの信号光の偏光状態を異なる状態にして、隣接チャンネルの信号光の相互作用による影響を削減することができる（請求項8）。次に、本発明の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、波長多重されるべき複数チャンネル用の複数の信号光送信部と、各信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施す複数の偏波スクランブラとをそなえて構成されるので、波長多重された複数チャンネルの信号光に対し、各偏波スクランブラによりそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すことができ、これにより、上述の（請求項1記載の）方法を適用した装置を極めて簡素な構成で容易に実現することができる（請求項9）。

【0119】具体的に、この場合は、複数の信号光送信部の全ての信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すべく、複数の偏波スクランブラをそなえて構成されるので、各偏波スクランブラにより複数の信号光送信部の全ての信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すことができ、より確実に、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる影響を複数チャンネルの信号光全体で平均化して削減することができる（請求項10）。

【0120】なお、上述の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置は、複数の信号光送信部の少なくとも一部の信号光送信部からの信号光に対してそれぞれ異なる周波数または所定の周波数で偏波スクランブルを施すべく、複数または1つの偏波スクランブラをそなえて構成し、少なくとも一部のチャンネルの信号光に対し、それぞれ異なる周波数または所定の周波数で偏波スクランブルを施しても、十分、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる影響を削減できる（請求項11）。

【0121】また、本発明の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、複数の信号光送信部を複数のグループに分割し、異なったグループを構成する信号光送信部からの信号に対しては、複数の偏波スクランブラによりそれぞれ異なる周波数で偏波スクランブルを施すので、偏波スクランブラの数を大幅に削減して、より簡素な構成で、各グループ毎の信号光の偏光状態を相互に異なった状態にできる（請求項12）。

【0122】なお、上述の複数の偏波スクランブラをそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、現用偏波スクランブラが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性も大幅に向上する（請求項13）。また、このとき、複数の信号光送信部を奇数チャンネルの信号光のグループと偶数チャンネルの信号光のグループとに分割し、奇数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部からの信号光に対して、第1偏波スクランブラにより第1周

波数で偏波スクランブルを施し、偶数チャンネルの信号光のグループを構成する信号光送信部からの信号光に対して、第2偏波スクランブラにより第1周波数とは異なる第2周波数で偏波スクランブルを施すこともできるので、さらに、簡素な構成で、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互により大きく異なった状態にできる（請求項14）。

【0123】なお、この場合も、上述の第1偏波スクランブラ及び第2偏波スクランブラをそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、現用偏波スクランブラが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性も大幅に向上する（請求項15）。

【0124】さらに、本発明の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置によれば、波長多重されるべき複数のチャンネル用の複数の信号光送信部をそなえ、複数の信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、複数の信号光送信部からの信号光に対しては、同一の周波数で偏波スクランブルを施す偏波スクランブラが設けられているので、複数のチャンネルの信号光に対し、偏波スクランブラによりそれぞれ異なる偏光方位で且つ同一の周波数で偏波スクランブルを施して、隣接チャンネルの偏光状態を所要量異なった状態にすることができる。従って、請求項5、6に記載の方法を適用した装置を極めて簡素な構成で容易に実現することができる（請求項16）。

【0125】また、このとき、一部の信号光送信部を奇数チャンネルの信号光用信号光送信部として構成するとともに、残りの信号光送信部を偶数チャンネルの信号光用信号光送信部として構成すれば、予め隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互に異なった状態にしておくことができるので、さらに、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を相互に大きく異なった状態にして、隣接チャンネルの信号光の相互作用により生じる影響を削減することができる（請求項17）。

【0126】さらに、このとき、複数の信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すように構成すれば、最も有効に、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を異なった状態にして、隣接チャンネルの信号光の相互作用による影響を削減することができる（請求項18）。

【0127】なお、この場合も、上述の偏波スクランブラを現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、現用偏波スクランブラが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性も大幅に向上する（請求項19）。また、本発明の偏波スクラ

ンブル式波長多重信号伝送装置によれば、奇数チャンネル用の信号光送信部のうちの一部と残りとしてそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、奇数チャンネルからの信号光に対しては、第3周波数で偏波スクランブルを施す第3偏波スクランブラを設け、且つ、偶数チャンネル用の信号光送信部のうちの一部と残りとしてそれぞれ異なる偏光方位となるように構成するとともに、偶数チャンネルからの信号光に対しては、第3周波数とは異なる第4周波数で偏波スクランブルを施す第4偏波スクランブラが設けられるので、各信号光の偏光状態を、奇数チャンネルの一部と残りの信号光、偶数チャンネルの一部と残りの信号光というように、より細かく異なった状態にすることができる。従って、より効率的に隣接チャンネルの信号光の相互作用による影響を削減することができる（請求項20）。

【0128】なお、この場合も、第3偏波スクランブラ及び第4偏波スクランブラをそれぞれ現用偏波スクランブラと予備用偏波スクランブラをそなえて二重化すれば、現用偏波スクランブラが使用不能となった場合でも、予備用偏波スクランブラにより処理を継続することができるので、本装置の信頼性も大幅に向上する（請求項21）。

【0129】また、このとき、奇数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すとともに、偶数チャンネルの信号光用信号光送信部のうちの一部の信号光送信部と残りの信号光送信部とでそれぞれ直交する偏光方位で偏波スクランブルを施すように構成されるので、最も有効に、隣接チャンネルの信号光の偏光状態を異なった状態にして、隣接チャンネルの信号光の相互作用による影響を削減することができる（請求項22）。

【0130】なお、上述の信号光送信部をそれぞれ現用信号光送信部と予備用信号光送信部とをそなえて二重化すれば、現用信号光送信部が使用不能となった場合でも、予備用信号光送信部により処理を継続することができるので、さらに、本装置の信頼性を向上させることができる（請求項23）。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の原理ブロック図である。

【図2】本発明の原理ブロック図である。

【図3】本発明の原理ブロック図である。

【図4】本発明の原理ブロック図である。

【図5】本発明の原理ブロック図である。

【図6】本発明の原理ブロック図である。

【図7】本発明の第1実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図8】第1実施形態における信号光送信部の構成を示すブロック図である。

【図9】第1実施形態における偏波スクランブラの構成を示す斜視図である。

【図10】第1実施形態における1:1分岐定偏波カプラの特性の一例を示す図である。

【図11】第1実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図である。

【図12】本発明の第2実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図13】本発明の第3実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図14】第3実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図である。

【図15】本発明の第4実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図16】第4実施形態において偏波スクランブラを二重化した構成を示すブロック図である。

【図17】本発明の第5実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図18】第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図である。

【図19】(a)～(e)はそれぞれ第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の動作を説明するための図である。

【図20】第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図である。

【図21】第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図である。

【図22】第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図である。

【図23】第5実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図である。

【図24】本発明の第6実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図で

ある。

【図25】本発明の第7実施形態としての偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図である。

【図26】第7実施形態の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図である。

【図27】(a), (b)はそれぞれ四光子混合波(FWM光)を説明するための図である。

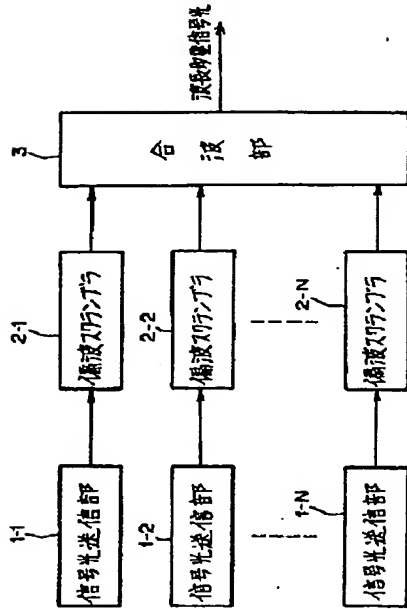
10 【図28】従来の偏波スクランブル式波長多重信号伝送装置の一例を示すブロック図である。

【符号の説明】

1-1~1-N, 12-1~12-m, 12-1~12-N 信号光送信部  
2, 2-1~2-N, 2-1~2-M 偏波スクランブラ  
2-1' 第1偏波スクランブラ  
2-2' 第2偏波スクランブラ  
2-1'' 第3偏波スクランブラ  
2-2'' 第4偏波スクランブラ  
3, 3-1~3-M, 4, 4-1, 4-2, 5 合波部  
12W-1~12W-2i 現用信号光送信部  
12P-1~12P-2i 予備用信号光送信部  
13-1~13-M, 16 合波器  
14-1', 14-2', 14-1~14-m, 14-1~14-M 偏波スクランブラ(PS)  
14W-1 現用偏波スクランブラ  
14P-1 予備用偏波スクランブラ  
15-1~15-m, 15-1~15-M 発振器  
15W-1 現用発振器  
15P-1 予備用発振器  
17 光ファイバ  
18W, 18P 増幅器(ポストアンプ)  
19 光スイッチ部  
121 レーザ・ダイオード(LD)  
122 変調部(MOD)  
141 導波管  
142 LiNbO<sub>3</sub>導波路  
143, 144 電極  
40 R1 終端抵抗

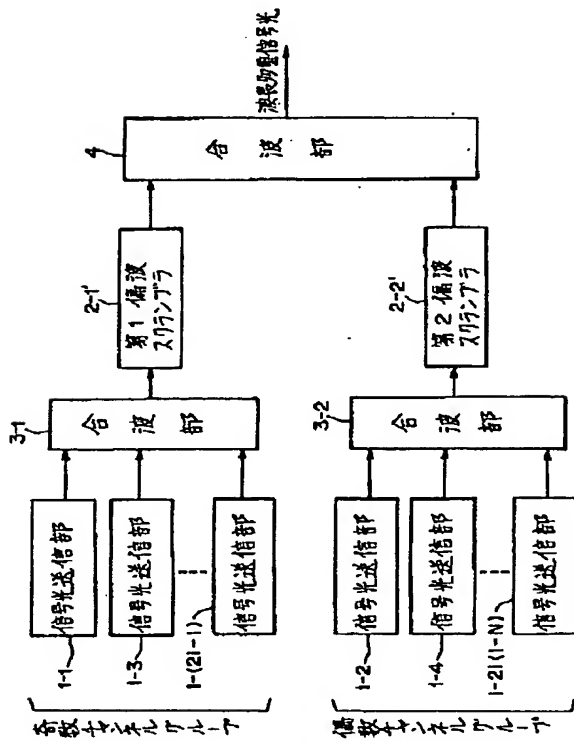
【図1】

本発明の原理ブロック図



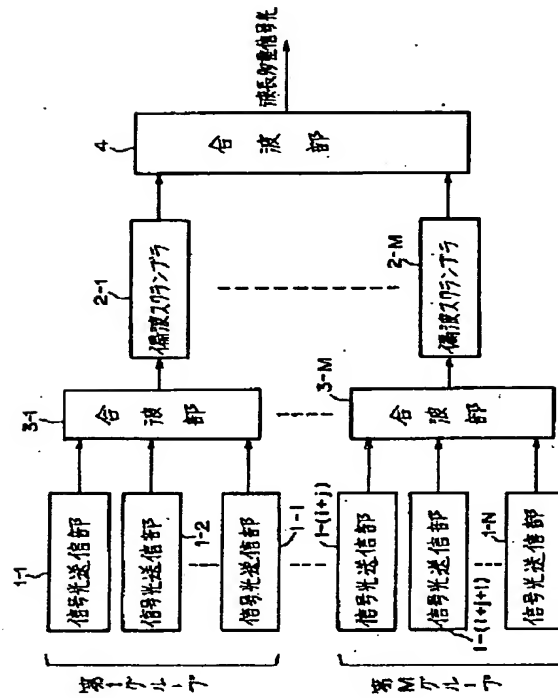
【図3】

本発明の原理ブロック図



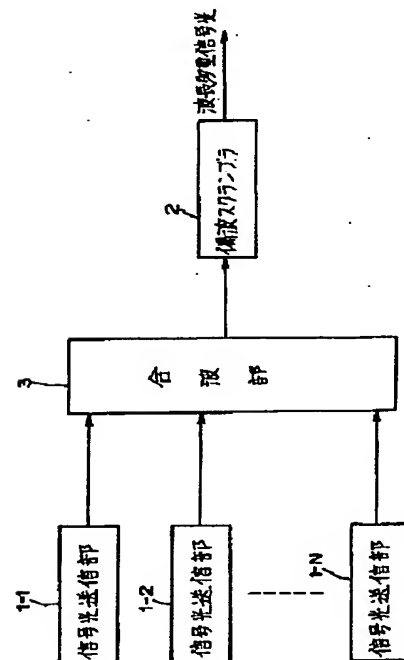
【図2】

本発明の原理ブロック図



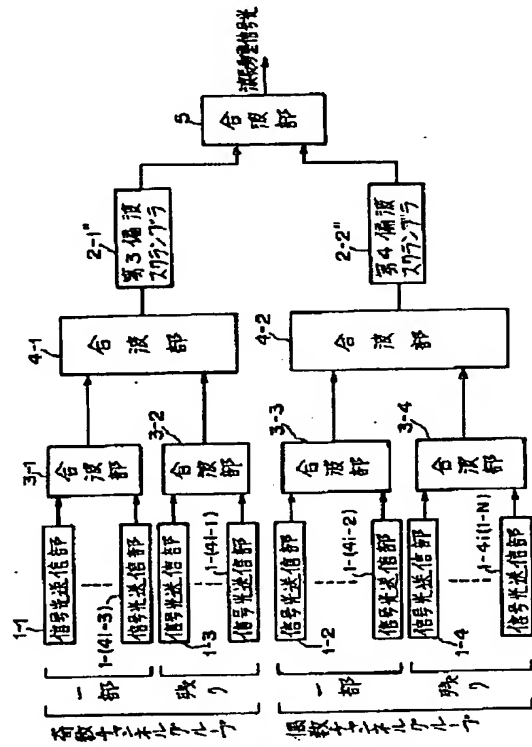
【図4】

本発明の原理ブロック図



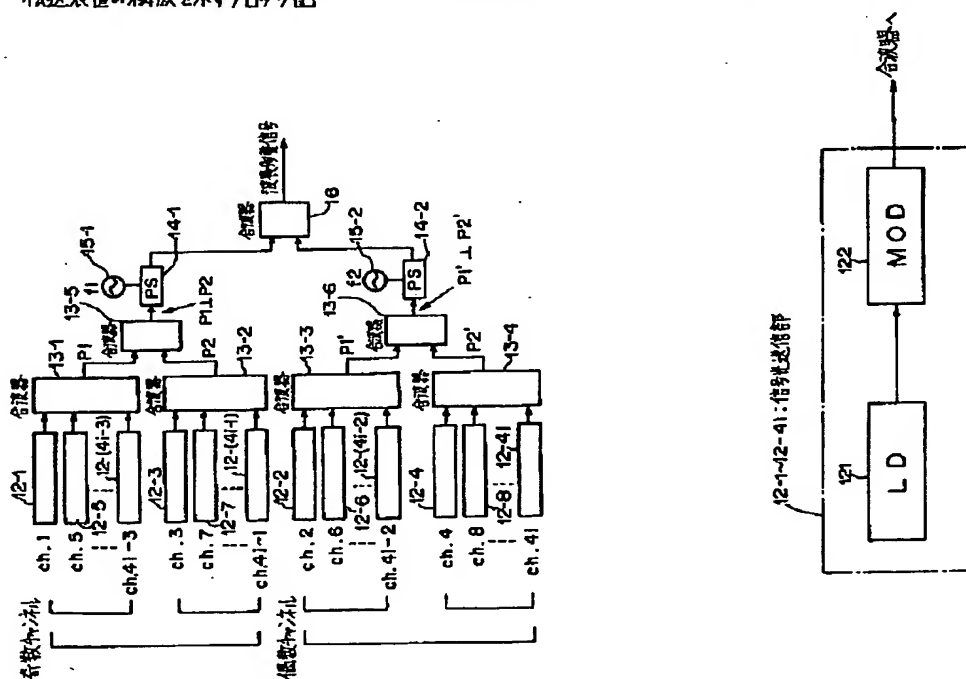
【図 6】

### 本発明の原理ブロック図



【图 8】

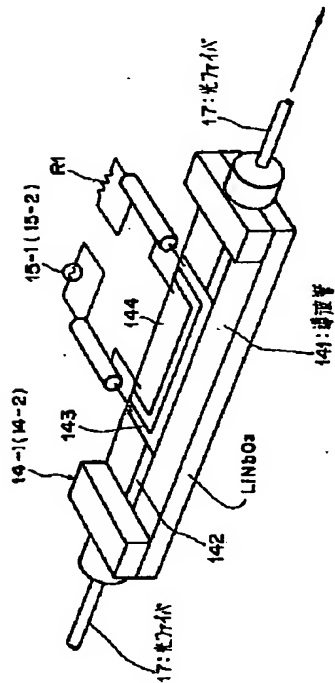
第1実施形態における信号光送信部の構成を示すブロック図





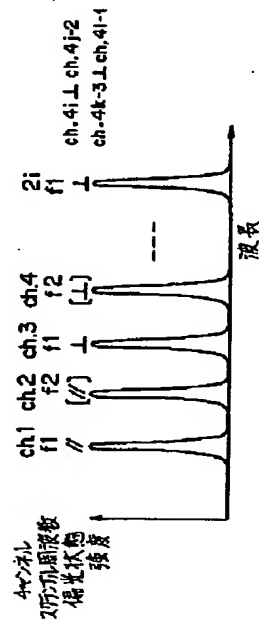
【図9】

第1実施形態における偏波スリット方式の構成を示す斜視図



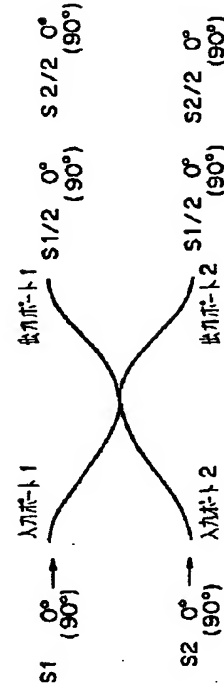
【図11】

第1実施形態の偏波スリット方式波長多重信号伝送装置における信号光の波スリットとチャンネル配置の一例を示す図



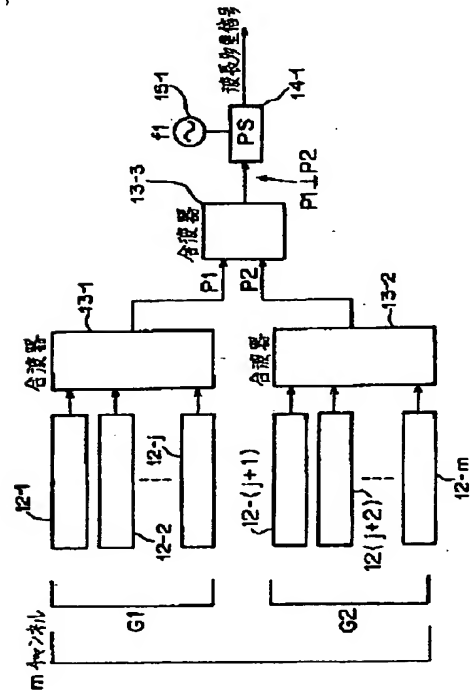
【図10】

第1実施形態における 1:1 分岐定偏波方向A特性A-例を示す図



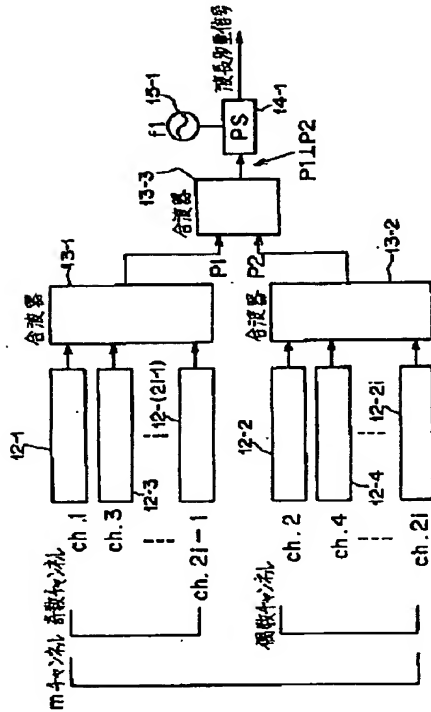
【図12】

本発明の第2実施形態としての偏波スリット方式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



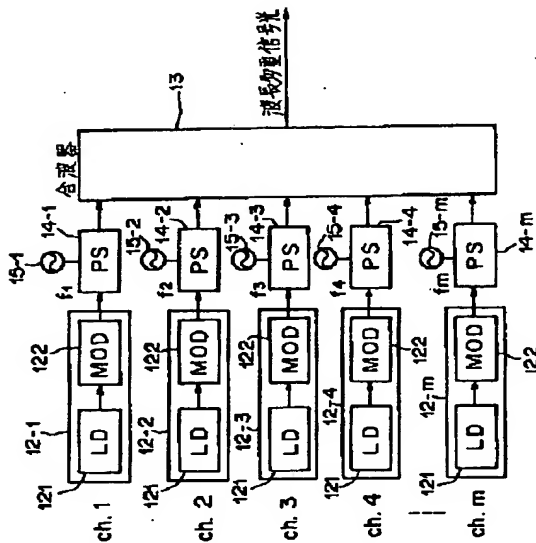
【図13】

本発明の第3実施形態としての偏波スプリング式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



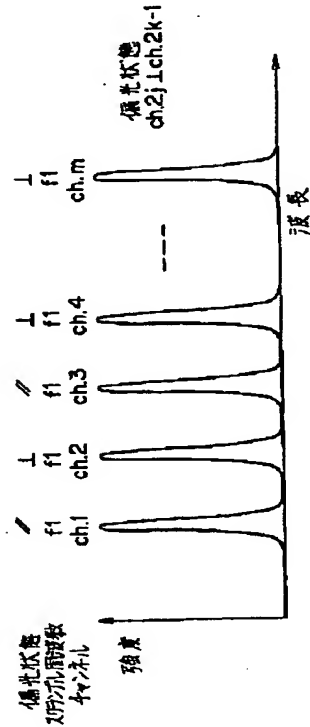
【図17】

本発明の第5実施形態としての偏波スプリング式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



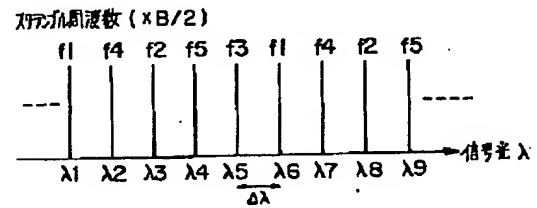
【図14】

第3実施形態の偏波スプリング式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スプリングとチャンネル配置の一例を示す図



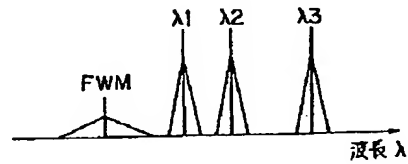
【図20】

第5実施形態の偏波スプリング式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図



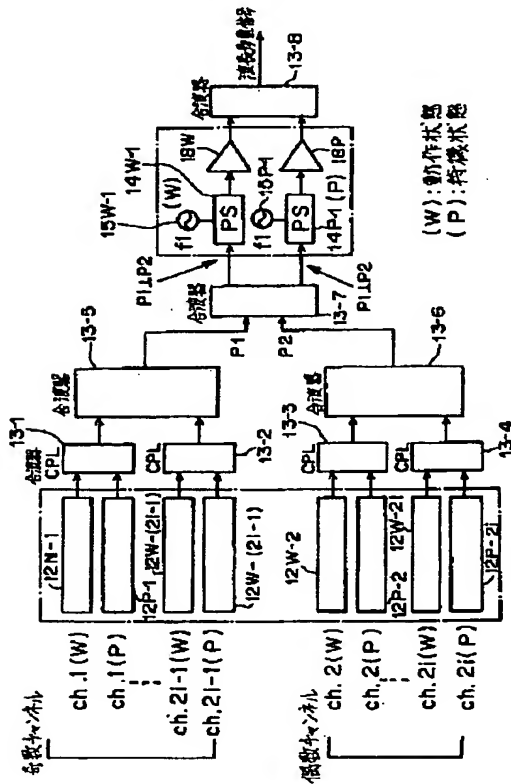
【図22】

第5実施形態の偏波スプリング式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図



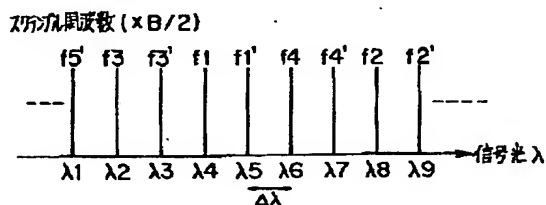
【図 15】

本発明の第4実施形態としての偏波スリット式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



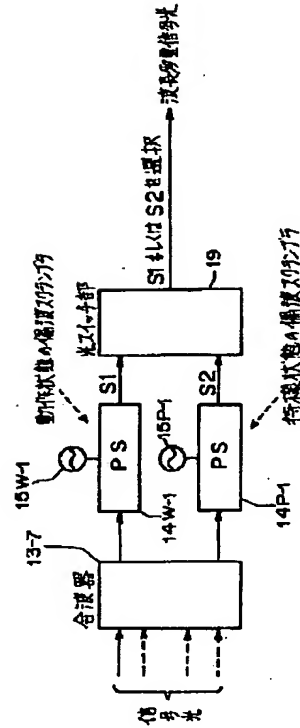
【図 21】

第5実施形態の偏波スリット式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図



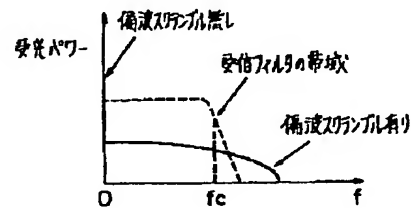
【図 16】

第4実施形態において偏波スリットを二重化した構成を示すブロック図



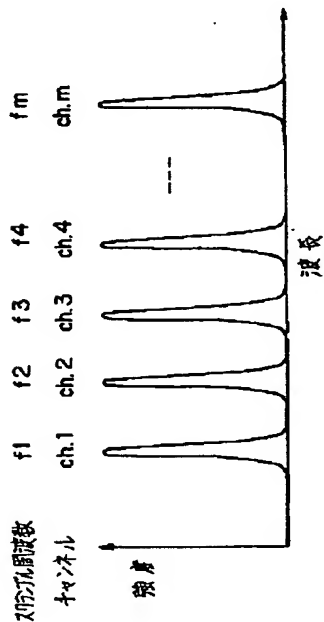
【図 23】

第5実施形態の偏波スリット式波長多重信号伝送装置の他の動作を説明するための図



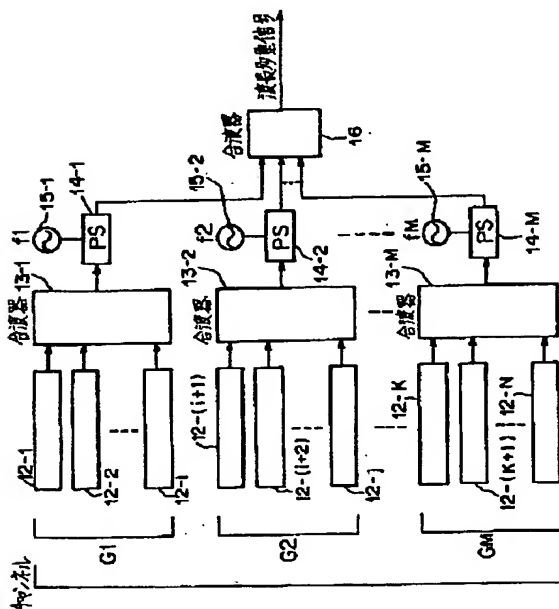
【図18】

第5実施形態の偏波スラング式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図



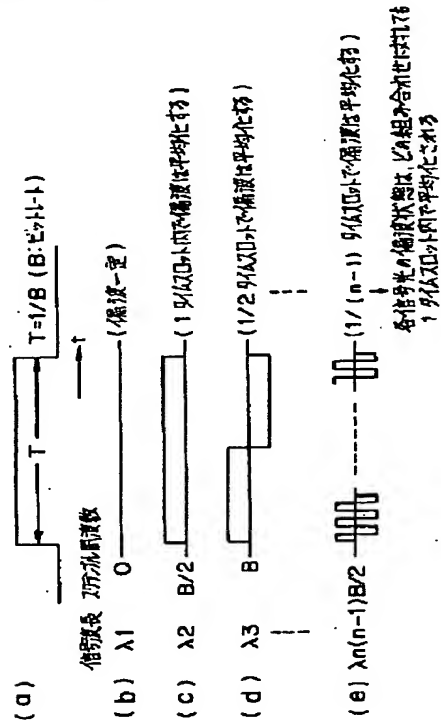
【図24】

本発明の第6実施形態としての偏波スラング式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



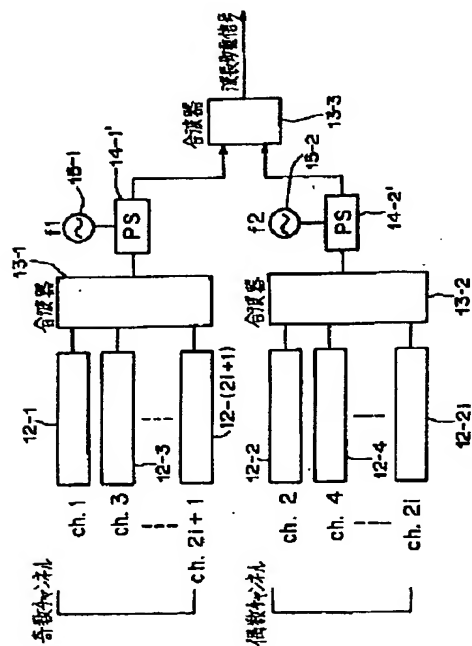
【図19】

第5実施形態の偏波スラング式波長多重信号伝送装置の動作を説明するための図



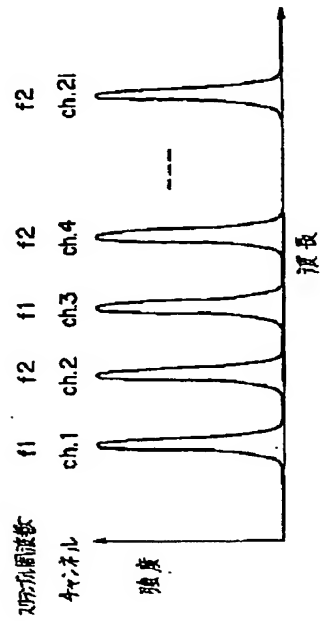
【図25】

本発明の第7実施形態としての偏波スラング式波長多重信号伝送装置の構成を示すブロック図



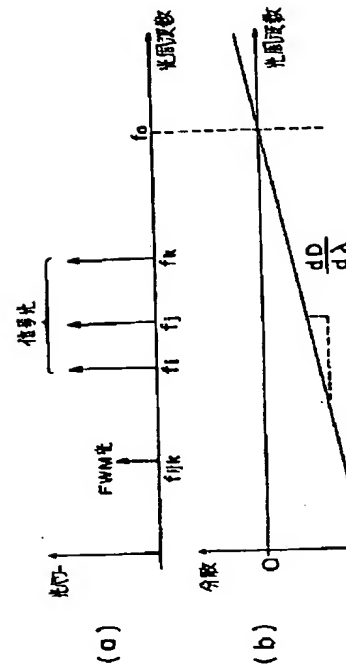
【図26】

第7実施形態の偏波スプリング式波長多重信号伝送装置にかかる信号光の光スペクトルとチャンネル配置の一例を示す図



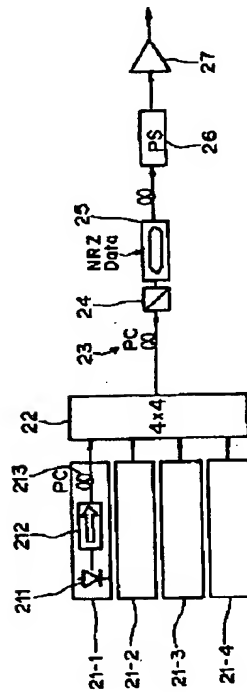
【図27】

四光子混合波(FWM光)を説明するための図



【図28】

従来の偏波スラング式波長多重信号伝送装置の例を示すブロック図



フロントページの続き

(72)発明者 寺原 隆文  
 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地  
 富士通株式会社内

(72)発明者 内藤 崇男  
 神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地  
 富士通株式会社内